

ارائه یک مدل ریاضی برای ارزیابی آثار زاویه رأس متغیر بر عملکرد شناورهای پروازی

پرویز قدیمی^۱، ساسان توکلی^۲، عباس دشتی منش^۳

pghadimi@aut.ac.ir

۱- استاد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس

چکیده

دستیابی به یک فرم بدنه مناسب، همواره یکی از چالش‌های اصلی در طراحی شناورهای پروازی بوده است. کوچکترین تغییرات در فرم هندسه شناور می‌تواند منجر به ایجاد تغییراتی چشمگیر در عملکرد شناور شود. در مقاله حاضر، سعی شده است تا با تهیه یک مدل ریاضی، زاویه تریم و مقاومت شناورهای پروازی با زاویه رأس متغیر محاسبه گردد. برای تهیه این مدل، از فشار وارد بر گوه در حال ورود به آب، استفاده شده است. مضافاً اینکه، تغییراتی در این مدل ایجاد شده است تا اثرات تغییر زاویه رأس در راستای طول شناور نیز در محاسبات، اعمال شود. عملکرد شناور با محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی، هیدرواستاتیکی و درگ صورت پذیرفته است. علاوه بر این، یک رابطه برای محاسبه سطح پاشش جاروبی ارائه شده است. صحت مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود مورد بررسی قرار گرفته و دقت مناسبی برای روش مشاهده شده است. با استفاده از روش ارائه شده، اثرات تغییرات زاویه رأس در راستای طول شناور بر عملکرد شناور مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که در صورتی که شیب تغییرات زاویه رأس در راستای طولی شناور کم باشد، عملکرد شناور نسبت به حالت منشوری شکل مطلوب‌تر است، اما در غیر این صورت عملکرد نامناسبی برای شناور حاصل می‌شود.

واژگان کلیدی: شناور پروازی، هیدرودینامیک، زاویه رأس متغیر، عملکرد، آب آرام.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۲/۱۱

۱- مقدمه

شناورهای پروازی از جمله شناورهای تندرویی هستند که به صورت گسترده‌ای در کشور مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. البته، اکثر شناورهای موجود در کشور، توسط مهندسين داخلی طراحی نشده و طرح‌های خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در زمان کنونی، احساس می‌شود که در راستای خودکفایی و بومی‌سازی طراحی شناورهای پروازی، ضروری است که گام‌هایی رو به جلو برداشته شود. در مقاله حاضر، سعی شده است یکی از گام‌های ابتدایی در این راستا بر داشته شود. این گام شامل فراهم نمودن ابزار لازم برای مهندسان می‌باشد که با استفاده از آن بتوانند اثرات تغییرات زاویه رأس در راستای طولی شناور (که در زبان انگلیسی به نام بدنه پروازی وارپ^۱ شناخته می‌شود) در آب آرام را مورد بررسی قرار بدهند.

ساویتسکی [۱] در سال ۱۹۶۴ با بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی دو دهه آزمایشگاه داویدسون یک روش ساده تجربی را برای محاسبه تریم دینامیکی و به دنبال آن عملکرد شناور پروازی ارائه نمود. این مدل یکی از پرکاربردترین مدل‌های تهیه شده برای شناورهای پروازی می‌باشد. در عین حال، این مدل تنها به شناورهای منشوری شکل محدود می‌شود و توانایی مدلسازی شناورهای با بدنه واقعی‌تر را ندارد (اینجا، منظور از بدنه‌های واقعی همان بدنه‌های پروازی با زاویه رأس متغیر در راستای طولی می‌باشد). در سال ۱۹۷۴، ساویتسکی و براون [۲] همان روش ساویتسکی [۱] را تا حدودی برای شناورهای پروازی غیرمنشوری با زاویه رأس متغیر در راستای طولی گسترش دادند. در سال‌های اخیر بورتولو و اولیویرو [۳] سعی در بهبود روابط ساویتسکی [۱] برای مدلسازی شناورهای پروازی با بدنه‌های واقعی نمودند. آنها در تحقیق مذکور، روش ساویتسکی [۱] را با روش پیرسون [۴] که مختص محاسبه نیرو و مرکز فشار در ورق‌های پروازی بود، ترکیب کردند و نتایج حاصل را با یک مدل تست در دانشگاه ناپولی مقایسه نموده و دقت نسبتاً مناسبی را از کار خود گزارش کردند. در سال ۲۰۱۲، ساویتسکی [۵] کوششی مجدد را برای اصلاح روش خود انجام داد و نهایتاً روابط جدیدی را برای مدلسازی هیدرودینامیک شناورهای پروازی با زاویه رأس متغیر در راستای طول (همان بدنه‌های پروازی وارپ شکل) ارائه داد.

البته این روابط تنها برای شناور پروازی‌ای که زاویه رأس آن به صورت خطی در راستای طول تغییر می‌کند، معرفی شد. جدای از روابط پیشنهادی ساویتسکی [۱] و تلاش‌های صورت گرفته برای بهبود آن، زارنیک [۶] رویکرد جدیدی را برای مدلسازی شناورهای پروازی پیشنهاد نمود. روش وی نیز دارای ماهیت تجربی بود و نیرو را به صورت تجربی محاسبه می‌کرد. هر چند این مدل برای آب مواج ارائه شده بود، اما توانایی محاسبه زاویه تریم شناور در آب آرام را نیز داشت. محققان زیادی سعی کردند که روش وی را تا حدی ارتقا دهند. در همین راستا، ایگرز [۷] برخی روابط تجربی زارنیک را اصلاح نمود و از آن برای محاسبه رفتار پایدار شناور پروازی در آب آرام و رفتار ناپایداری آن در موج پرداخت. ژائو و همکاران [۸] نیز از همین تئوری استفاده نمودند، اما آنها در روش خود، از روش عددی المان مرزی برای محاسبه نیرو استفاده نمودند. وروس [۹] نیز یک مدل خاص برای برای مدلسازی پدیده برخورد، ارائه کرد که توانایی بهره‌گیری در مدلسازی شناور با کمک تئوری دو و نیم بعدی را دارا بود. این روش از روش‌های پیشین جامع‌تر بوده و شناورهایی با مقاطع مختلف را پوشش می‌داد، اما پیاده‌سازی این روش بسیار دشوار بود. ساوندرو و همکاران [۱۰] نیز در سال ۲۰۰۲ یک روش خاص برای مدلسازی هیدرودینامیک شناور پروازی ارائه دادند. این روش قابلیت بسیار بالایی در مدلسازی شناورهای پروازی با فرم‌های مختلفی داشت تا اینکه در سال ۲۰۱۰، ساوندرو و همکاران [۱۱] از آن برای بررسی اثرات تغییرات زاویه رأس در راستای طول شناور استفاده نمودند. در مقاله حاضر، با استفاده از تئوری دو و نیم بعدی از پدیده برخورد گوه به آب استفاده خواهد شد تا با استفاده از فشار ناشی از این برخورد، نیروهای وارد بر شناور محاسبه شود. در مدلسازی برخورد به آب، یک رابطه‌ای جدید به منظور در نظر گیری اثرات تغییر زاویه رأس پیشنهاد شده است. با در نظرگیری درگ وارد بر شناور و همچنین اثرات گرانش، نیروهای نهایی وارد بر شناور محاسبه خواهند شد. مضافاً اینکه، در کنار این نیروها، نیروی درگ حاصل از پاشش نیز در محاسبات در نظر گرفته خواهد شد. برای این منظور، یک رابطه جدید برای محاسبه سطح پاشش نیز ارائه شده است. در نهایت، یک الگوریتم مشخص تهیه خواهد شد که با استفاده از آن زاویه تریم و مقاومت شناور محاسبه شوند. با

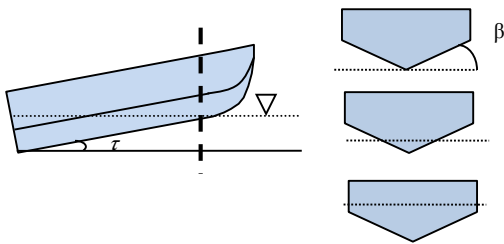
¹ Warped Planing Hull

$$t = \frac{L_k \cos \tau}{U} \quad (2)$$

حل شود که در آن جسم با سرعت

$$w = U \sin \tau \quad (3)$$

به آب برخورد می نماید. این پدیده در شکل (۲) نشان داده شده است.



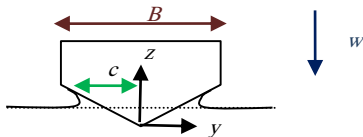
شکل (۲) استفاده از روش دو و نیم بعدی برای مدلسازی شناور پروازی.

با فرض سیال ایده آل، می توان پتانسیل حول جسم گوه ای شکل در حال ورود به آب با سرعت w را (شکل (۳)) با استفاده از رابطه

$$\phi = w \sqrt{c^2 - y^2} \quad (4)$$

بدست آورد که در آن c نیم عرض متوسط خیس شده و y فاصله عرضی از رأس گوه می باشند. در صورت اعمال قانون برنولی در تابع پتانسیل فوق، فشار با رابطه زیر حاصل می شود.

$$p = \rho \left(\frac{wcc}{\sqrt{c^2 - y^2}} - \frac{w^2}{2} \frac{y^2}{c^2 - y^2} \right) \quad (5)$$



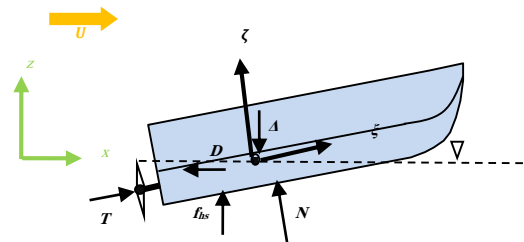
شکل (۳) گوه در حال ورود به آب.

استفاده از رابطه (۵)، نیازمند محاسبه مقدار c و مشتق زمانی آن یعنی \dot{c} در هر مقطع از شناور می باشد. برای این منظور، دو فاز در نظر گرفته می شود. فاز اول شامل فاز خشکی هر دو چاین می باشد و فاز دوم شامل خیس شدگی هر دو چاین است که با رسیدن ریشه پاشش به چاین و جدایش جریان، حاصل می شود (شکل (۴)). در آغاز فرآیند حل، چاین در فاز خشک بوده و سپس به فاز چاین خیس، تغییر پیدا می نماید. در صورتی که زمان شروع حل صفر در نظر گرفته شود، زمان

استفاده از این مدل، سعی خواهد شد تا اثرات زاویه رأس متغیر بر رفتار شناور مورد بررسی قرار گیرد.

۲- روابط ریاضی حاکم بر مسئله

تحلیل عملکرد یک شناور پروازی شامل محاسبه مقاومت و زاویه تریم دینامیکی آن در آب آرام می باشد. در این حالت، فرض می شود که همانند شکل (۱) شناور با سرعت U رو به جلو حرکت کرده و نیروی وزن شناور (Δ)، نیروی درگ (D)، نیروی عمودی هیدرو دینامیکی (N)، نیروی هیدرو استاتیکی (B) و نیروی تراست بر شناور وارد می شوند. نوشتن یک معادله حرکت برای این نیروها، مستلزم در نظر گرفتن دو سیستم مختصات است: یک دستگاه راستگرد ثابت xz که معادلات حرکت نسبت به آن نوشته می شوند و یک دستگاه $\xi\zeta$ به مرکزیت مرکز ثقل در نظر گرفته می شود که نه تنها با سرعت شناور حرکت می کند، بلکه حرکات شناور را نیز دارا می باشد.



شکل (۱) نیروهای هیدرو دینامیکی وارد بر شناور پروازی.

با در نظر گرفتن عدم وجود هیچ گونه حرکت دیگری توسط شناور، سه معادله

$$\begin{aligned} 0 &= T_x + N_x + D_x \\ 0 &= \Delta + T_z + N_z + B_z + D_z \\ 0 &= T_\theta + N_\theta + B_\theta + D_\theta \end{aligned} \quad (1)$$

بر حرکت شناور، حاکم می شوند. برای دستیابی به زاویه تریم و مقاومت، ضروری است که نیروهای آورده شده در معادله (۱)، محاسبه شوند. برای محاسبه این نیروها، از رویکرد دو و نیم بعدی استفاده خواهد شد.

۲-۱- تئوری دو و نیم بعدی

با استفاده از تئوری دو و نیم بعدی، می توان همانند شکل (۲) مسئله سه بعدی را به یک مسئله ورود گوه به آب کاهش داد که در آن می بایست مسئله در مدت زمان

$$\dot{c} = \frac{w^2}{2} \frac{B/2}{c\sqrt{c^2 - (B/2)^2}} + \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \frac{1}{\tan \beta} \frac{d\beta}{dt} \quad (12)$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + \left[\frac{3}{2}\left(\frac{B}{2}\right)^2 (t - t_{cw})\right]^{2/3}} + \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \frac{1}{\tan \beta} U \frac{\partial \beta}{\partial \xi} (t - t_{cw}) \quad (13)$$

در هر دوی روابط (۱۲) و (۱۳)، اثرات تغییرات زاویه رأس اعمال شده است.

۲-۲- نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر مقطع شناور

برای هر مقطع از شناور، سه نیرو که عبارتند از نیروی هیدرودینامیکی، نیروی هیدرواستاتیکی، و نیروی درگ اصطکاکی، در نظر گرفته می‌شود. نیروی هیدرودینامیکی با انتگرال‌گیری از فشار مطابق رابطه

$$\mathbf{f}_{HD} = \mathbf{j} \int_S p dl \sin \beta + \mathbf{k} \int_S p dl \cos \beta \quad (14)$$

$$= 0\mathbf{j} + f_{HD}^V \mathbf{k}$$

حاصل می‌شود که در آن به دلیل تقارن سمت راست و چپ شناور، نیرویی در راستای افقی وجود نداشته و تنها نیرو در راستای قائم (راستای ξ)، حاصل خواهد شد. نیروی هیدرو استاتیکی نیز با محاسبه حجم مغروق هر مقطع از شناور و با رابطه

$$\begin{cases} f_{HS} = \rho g \frac{c^2 \cot \beta}{2} & t < t_{cw} \\ f_{HS} = \rho g \frac{\left(\frac{B}{2}\right)^2 \cot \beta}{2} & t > t_{cw} \end{cases} \quad (15)$$

حاصل می‌شود. نیروی درگ وارد بر هر مقطع نیز با استفاده از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$D_\xi = \frac{1}{2} \rho C_F U^2 S_\xi \quad (16)$$

که در آن سطح خیس شده هر مقطع با استفاده از رابطه (۱۷) و ضریب درگ اصطکاکی با رابطه (۱۸) بدست می‌آید.

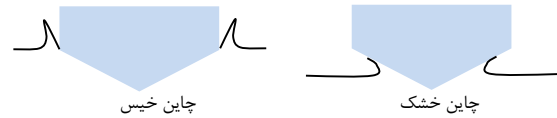
$$\begin{cases} S_\xi = 2c / \cos \beta & t < t_{cw} \\ S_\xi = 2B / \cos \beta & t > t_{cw} \end{cases} \quad (17)$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} + 0.0004 \quad (18)$$

$$Rn = \frac{UL_m}{\nu}$$

گذر از فاز چاین خشک به چاین خیس با رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$t_{cw} = \frac{z_{cw}}{w} = \frac{\frac{B}{2} \cot \beta}{w} \quad (6)$$



شکل (۴) وضعیت خیسی چاین‌ها.

در تئوری‌های پیشین، فاز چاین خشک مقدار نیم عرض خیس شده با استفاده از رابطه

$$c = \left(\frac{\pi}{2} - \beta_i \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)\right) \frac{w}{\tan \beta} t \quad (7)$$

بدست می‌آید و مشتق آن نسبت به زمان نیز با استفاده از رابطه

$$\dot{c} = \frac{\pi}{2} \frac{w}{\tan \beta} \quad (8)$$

حاصل می‌شود. اما در مقاله حاضر، با توجه به آن که زاویه رأس نیز در زمان تغییر می‌کند، رابطه (۸) به صورت رابطه

$$\dot{c} = \frac{dc}{dt} + \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \frac{1}{\tan \beta} \frac{d\beta}{dt} \quad (9)$$

اصلاح می‌شود (همانگونه که مشخص است، در رابطه (۹) بر خلاف رابطه ۸، اثرات تغییر زاویه رأس نیز اعمال شده است که با مشتق‌گیری زمانی از رابطه (۷) و فرض تغییر زاویه رأس با زمان بدست آمده است) که در آن روابط زیر مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

$$\frac{dc}{dt} = \left(\frac{\pi}{2} - \beta \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)\right) \frac{w}{\tan \beta} \quad (10)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{\partial \beta}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} = U \frac{\partial \beta}{\partial \xi} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، $\partial \beta / \partial \xi$ شیب تغییرات زاویه رأس در راستای طول شناور می‌باشد. برای فاز چاین خیس نیز آلگاریتم و تاسکون [۱۳] رابطه‌ای تحلیلی را ارائه داده‌اند که اثرات زاویه رأس متغیر را در نظر نمی‌گیرد. به طور مشابه، روابط مربوط به فاز خیس نیز اصلاح خواهند شد. مشتق نیم‌عرض خیس شده نسبت به زمان، با اصلاح رابطه آلگاریتم و تاسکون [۱۳] به شکل رابطه (۱۲) حاصل می‌شود و رابطه جدید (۱۳) برای مقدار نیم عرض خیس شده، بدست می‌آید.

$$B_{\theta} = \int_{L_x} F_{red} f_{HS} \xi d\xi \quad (24)$$

نهایتاً گشتاور حاصل از درگ اصطکاکی با استفاده از رابطه

$$B_{\theta} = \zeta_D \int_{L_x} D_{\xi} d\xi \quad (25)$$

بدست می‌آید که در آن ζ_D موقعیت عمودی مرکز نیروی درگ اصطکاکی به دستگاه مختصات قرار گرفته در مرکز ثقل شناور می‌باشد که با رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\zeta_D = \frac{\int_{L_x} \frac{c}{\tan \beta} \xi d\xi}{\int_{L_x} \frac{c}{\tan \beta} d\xi} - VCG \quad (26)$$

۲-۳-۳- نیروهای افقی

نیروهای افقی وارد بر شناور، همانند نیروهای قائم، با انتگرال گیری در راستای طولی شناور حاصل می‌شوند. نیروی افقی حاصل از نیروی هیدرودینامیکی برابر با

$$N_z = \int_{L_x} F_{red} f_{HD}^V \sin \tau d\xi \quad (27)$$

می‌باشد. نیروی افقی حاصل از درگ نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$D_z = \int_{L_x} D_{\xi} \cos \tau d\xi \quad (28)$$

۲-۳-۴- در نظرگیری پاشش جاروبی

ساویتسکی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۰۷ به اهمیت در نظرگیری درگ حاصل از پاشش جاروبی در محاسبات اشاره نمودند. در مقاله حاضر، روابط جدیدی برای در نظرگیری این مقاومت ارائه شده است. برای دستیابی به این روابط، کف شناور به صورت تصویر به نمایش در آمده در شکل (۵)، در نظر گرفته شده است. در این تصویر، دو خط قابل رویت می‌باشند. خط اول خط سکون شناور است که از تقاطع آب آرام با کیل به تقاطع چاین با آب وصل می‌شود. خط دیگر، لبه پاشش جاروبی می‌باشد. ساویتسکی و همکاران [۱۵] بیان نمودند که این خط، دارای زاویه‌ای است که دو برابر زاویه خط آب سکون با جهت کیل می‌باشد. البته بگویچ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۲، این قضیه را رد نمودند و بیان کردند که در تمامی آزمایش‌های خود مشاهده نمودند که این زاویه ۱/۵ برابر زاویه خط سکون می‌باشد.

نحوه محاسبه L_m در بخش‌های بعدی تشریح می‌شود.

۲-۳- نیروهای وارد بر شناور

۲-۳-۱- نیروهای قائم

با انتگرال گیری از مقادیر نیروهای هر مقطع در راستای طول شناور، نیروهای وارد بر شناور حاصل خواهند شد. این در حالیست که برای نیروی عمودی هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی، یک تابع کاهش‌ی مانند

$$F_{red} = \tanh \left(\frac{2.5}{a' BFn_b} (\xi^T - \xi) \right) \quad (19)$$

نیز اعمال می‌شود. این تابع، پیش از این توسط گارمه [۱۴] معرفی شده است و اثرات پاشنه ترانسوم را در نیروی دو بعدی اعمال می‌نماید. در این تابع، a' فاصله بی‌بعدی است که در آن کاهش حاصل از ترانسوم شروع می‌شود. مقدار این فاصله در این مقاله برابر با ۰/۳۴ در نظر گرفته می‌شود. در صورت انتگرال گیری، نیروی هیدرودینامیکی وارد بر کف شناور برابر با

$$N_z = \int_{L_x} F_{red} f_{HD}^V \cos \tau d\xi \quad (20)$$

خواهد بود. می‌بایست به این نکته اشاره نمود که با توجه به آن که نیروی f_{HD}^V در راستای z بوده، در راستای محور z تصویر شده است تا مقدار نیروی هیدرودینامیکی لیفت بدست آید. به طور مشابه، با انتگرال گیری در راستای طول شناور، می‌توان نیروی هیدرواستاتیکی وارد بر جسم را محاسبه نمود:

$$B_z = \int_{L_x} F_{red} f_{HS} d\xi \quad (21)$$

با یک انتگرال گیری در راستای طول شناور، درگ وارد بر شناور در راستای قائم برابر می‌شود با:

$$D_z = \int_{L_x} D_{\xi} \sin \tau d\xi \quad (22)$$

۲-۳-۲- گشتاورهای پیچ

گشتاورهای پیچ وارد بر شناور با ضرب نیروی هر مقطع در فاصله آن از مرکز ثقل حاصل می‌شود. بدین ترتیب می‌توان گشتاور پیچ حاصل از نیروی عمودی را با (۲۳) محاسبه کرد.

$$N_{\theta} = \int_{L_x} F_{red} f_{HD}^V \xi d\xi \quad (23)$$

همچنین، گشتاور حاصل از نیروی هیدرواستاتیکی برابر می‌شود با:

۲-۳-۶- طول خیس شده شناور

برای شناور، دو طول خیس شده شامل طول خیس شده کیل و طول خیس شده چاین، در نظر گرفته می‌شود. طول خیس شده کیل با استفاده از رابطه

$$L_k = \frac{1}{\cos \tau} \int_0^l U dt \quad (37)$$

حاصل می‌شود و طول خیس شده چاین با بکارگیری رابطه

$$L_c = \frac{1}{\cos \tau} \int_{l_{cw}}^l U dt \quad (38)$$

بدست می‌آید. در نهایت، طول خیس شده میانگین شناور از رابطه زیر قابل دستیابی خواهد بود.

$$L_m = \frac{L_k + L_c}{2} \quad (39)$$

۲-۳-۷- دستیابی به وضعیت تعادلی شناور

با استفاده از رابطه (۱) و نیروهای حاصل شده، می‌توان یک دستگاه دو معادله و دو مجهول برای وضعیت تعادلی شناور بدست آورد. این دستگاه دو معادله و دو مجهول به شکل

$$\begin{cases} N_z + B_z + D_z + D_z^{Spray} + T_z - \Delta = 0 \\ N_\theta + B_\theta + (D_\theta + D_\theta^{Spray}) + T_\theta = 0 \end{cases} \quad (40)$$

بوده که در آن، نیروهای حاصل از تراست با استفاده از روابط

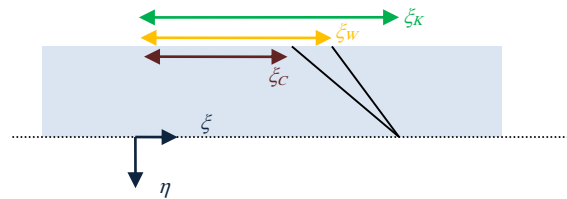
$$T_z = T \sin \tau \quad (41)$$

$$T_\theta = T \sin(\tau + \theta_\tau) \zeta_\tau + T \cos(\tau + \theta_\tau) LCG$$

محاسبه می‌شوند. بعد از دستیابی به این معادلات، ضروری است که زاویه تریم، مشخص و طول خیس شده صحیحی از شناور پیدا شود که دستگاه معادلات (۴۰) را ارضاء نمایند.

۳- محاسبه وضعیت تعادلی شناور

برای محاسبه وضعیت تعادلی شناور، از یک روش تکرار در تکرار استفاده خواهد شد. در این روش تکرار در تکرار، در ابتدا زاویه تریمی برای شناور حدس زده می‌شود. سپس برای این زاویه تریم، یک طول خیس شده حدس زده می‌شود. با این طول خیس شده و زاویه تریم، تک تک جمله‌های آورده شده در معادله اول دستگاه (۴۰) محاسبه شده و سپس در معادله اول دستگاه جایگذاری می‌شوند. در صورتی که جمع این مقادیر بزرگتر از صفر شد، طول خیس شده حدس زده می‌بایست کاهش بیاید. در غیر این صورت، می‌بایست مقدار آن افزایش یابد. تغییرات طول خیس شده تا زمانی ادامه پیدا



شکل (۵) کف شناور پروازی.

با بهره‌گیری از آن چه بگوینج و همکاران [۱۵] مطرح نموده‌اند، می‌توان سطح خیس شده پاشش، قبل از رسیدن آن به چاین را با استفاده از رابطه

$$S_{Spray} = 2 \left\{ \frac{\tan \left(1.5 \left(\tan^{-1} \frac{c \xi}{\xi_k - \xi} \right) \right) (\xi - c)}{\cos \beta} \right\} \quad (29)$$

بدست آورد. بعد از رسیدن پاشش به چاین تا زمانی که چاین خیس می‌شود، می‌توان سطح خیس شده را با رابطه

$$S_{Spray} = 2 \left\{ \frac{B/2 - c}{\cos \beta} \right\} \quad (30)$$

محاسبه نمود. لذا، می‌توان نیروی درگ پاشش وارد بر شناور را با استفاده از

$$D^{Spray} = \frac{1}{2} \rho C_f U^2 \left(\int_{\xi_c}^{\xi_k} S_{Spray} d\xi \right) \quad (31)$$

بدست آورد. در نتیجه، نیروهای حاصل از درگ پاشش در راستاهای مختلف عبارتند از:

$$D_z^{Spray} = D^{Spray} \sin \tau \quad (32)$$

$$D_x^{Spray} = D^{Spray} \cos \tau \quad (33)$$

$$D_\theta^{Spray} = D^{Spray} \zeta_{Spray} \quad (34)$$

در این روابط، موقعیت عمودی مرکز پاشش، نسبت به دستگاه مختصات واقع در مرکز مختصات می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\int S_{Spray} \xi d\xi \quad (35)$$

$$\zeta_{Spray} = \frac{\int_{L_c}^{L_k} S_{Spray} d\xi}{L_c} - VCG$$

۲-۳-۵- مقاومت شناور

مقاومت شناور، با در نظر گرفتن نیروها در راستای افق حاصل می‌شود. لذا، مقاومت را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$R = D_x + N_x + D_x^{Spray} \quad (36)$$

نمایش داده شده است. در این شکل، دو مقطع پاشنه و سینه شناور نیز مشخص شده‌اند که گویای این امر بوده که زاویه رأس این دو مقطع برای حالت‌های غیرمنشوری (یعنی مدل های W1، W2 و W3) متفاوت است. نتایج آزمایشگاهی آنها شامل زاویه تریم و مقاومت شناور در آب آرام می‌باشد که توسط بگوپیچ و برترلو [۱۶] اندازه‌گیری شده است. با استفاده از مدل حاضر، برای هر کدام از شناورهای این سری، زاویه تریم و مقاومت محاسبه شده و با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در [۱۶] مقایسه شده است. این مقایسه در شکل‌های (۸) و (۹) به نمایش در آمده است. در شکل (۸)، مقادیر زاویه تریم پیش‌بینی شده و در شکل (۹)، مقادیر مقاومت پیش‌بینی شده بر حسب عدد فرود عرضی همراه با مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر چهار شناور موجود در سری شناور پروازی ناپولی، رسم شده‌اند. همچنین در هر نمودار، مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از روش ساویتسکی [۱] نیز به نمایش در آمده است.

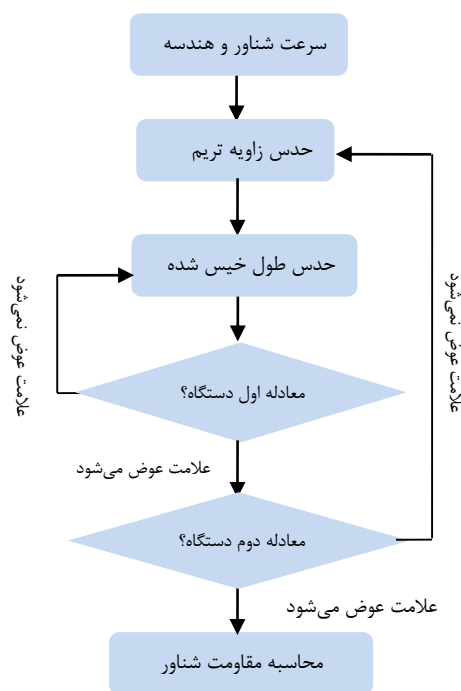
شکل (۸)، نشانگر دقت مناسب روش حاضر در پیش‌بینی زاویه تریم می‌باشد. با توجه به نمودارهای ترسیم شده در این شکل، روش حاضر زاویه تریم را با روندی مشابه روند مربوط به نتایج آزمایشگاهی، پیش‌بینی می‌نماید. خطاهای بزرگ مربوط به روش حاضر در عدد فرود عرضی کوچکتر از ۲ مشاهده می‌شود که این عدد فرود در بازه پروازی محسوب نمی‌شود. خطای مربوط به روش با استفاده از رابطه

$$E\% = \frac{|a^{EXP} - a^{PRE}|}{a^{EXP}} \quad (42)$$

تخمین زده شده است. مقادیر خطا در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. خطای مشخص شده با عبارت PM خطای روش حاضر و خطای مشخص شده با SAV خطای روش ساویتسکی می‌باشد. مقادیر خطا نشانگر خطای کم روش حاضر در پیش‌بینی زاویه تریم شناور می‌باشند.

مقادیر ترسیم شده برای مقاومت در شکل (۹)، نشان‌دهنده دقت مطلوب روش ارائه شده در پیش‌بینی مقاومت شناور، می‌باشد. روند پیش‌بینی شده، شبیه روند مربوط به نتایج آزمایشگاهی می‌باشد و مقادیر محاسبه شده نزدیک به نتایج آزمایشگاهی هستند. خطای روش حاضر و روش ساویتسکی [۱]، در جدول (۳) نمایش داده شده است.

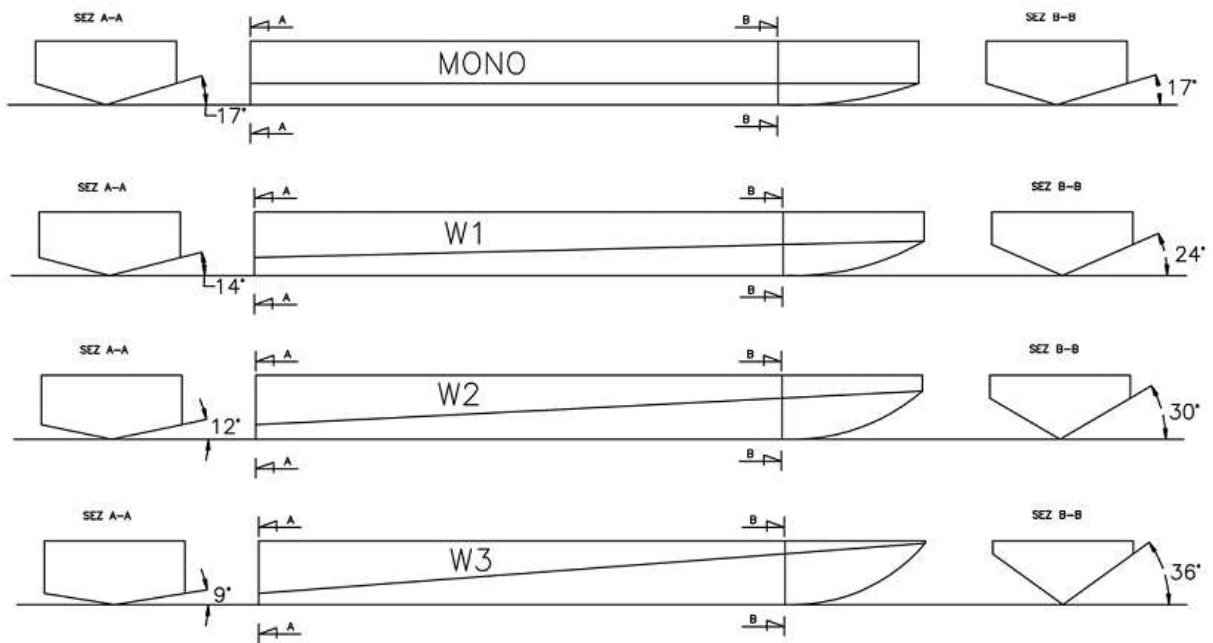
می‌کند که علامت عبارت حاصل از معادله اول دستگاه (۴۰)، تغییر نمایند. سپس با طول خیس شده بدست آمده، عبارت‌های موجود در معادله دوم دستگاه (۴۰) محاسبه می‌شوند. در صورتی که جمع عبارت‌ها بزرگتر از صفر بود، مقدار زاویه تریم می‌بایست کاهش پیدا نماید. در غیر این صورت، این مقدار افزایش خواهد یافت. تکرارهای زاویه تریم نیز تا زمانی که علامت عبارت عوض شود، ادامه پیدا می‌کند. الگوریتم مربوط به این محاسبات در شکل (۶) به نمایش گذاشته است.



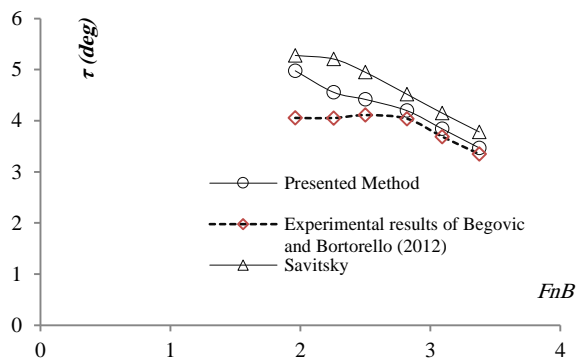
شکل (۶) الگوریتم محاسبات.

۴- صحت سنجی

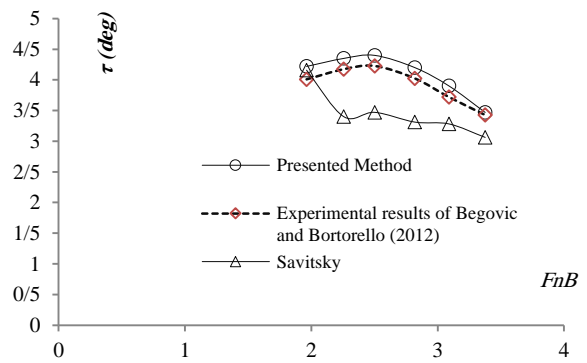
برای صحت سنجی روش ارائه شده، سعی شده است که مقایسه‌ای با نتایج آزمایشگاهی بگوپیچ و برترلو [۱۶] صورت پذیرد. این محققین یک سری شناور پروازی به نام سری شناور پروازی ناپولی که شامل چهار شناور بود، معرفی نمودند. در این سری، یکی از شناور دارای بدنه منشوری شکل (MONO) و سه مورد دیگر بدنه‌هایی با زاویه رأس متغیر (تغییرات به شکل خطی) می‌باشند (W1 و W2 و W3). اطلاعات مربوط به این شناورها، در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین، هندسه این شناورها نیز در شکل (۷)



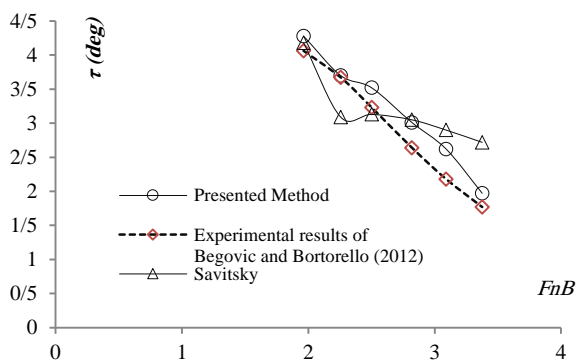
شکل (۷) هندسه سری شناورهای پروازی ناپولی [۱۶].



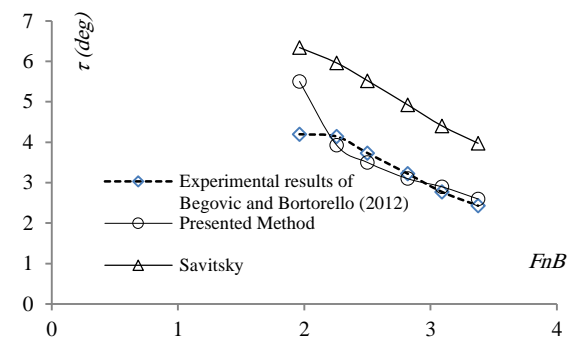
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۸) زاویه تریم پیش‌بینی شده برای شناورهای پروازی ناپولی با نتایج آزمایشگاهی [۱۶]: (الف) بدنه MONO، (ب) بدنه W1، (ج) بدنه W2 و (د) بدنه W3.

جدول (۱) ویژگی های هندسی شناورهای ناپولی [۱۶].

پارامتر	شناور منشوری (MONO)	شناور وارپ ۱ (W1)	شناور وارپ ۲ (W2)	شناور وارپ ۳ (W3)
L / (m)	1.9	1.9	1.9	1.9
B / (m)	0.42	0.42	0.42	0.42
β / (°) در ترانسوم	16.61	14.31	11.59	11.59
C_{Δ}	0.427	0.42	0.42	0.42
L/B	4.48	4.48	4.48	4.48
VCG	0.14	0.15	0.15	0.15
LCG / (%L)	63.5	65.2	67.9	69.5
$\partial\beta/\partial\xi$ در طول بی بعد	0	2.67	5.24	7.52

جدول (۲) خطای روش حاضر در پیش بینی زاویه تریم شناور پروازی ناپولی.

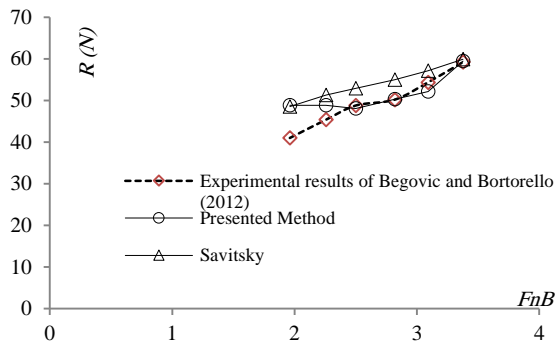
W1			MONO		
$F_n B$	E%PM	E%SAV	$F_n B$	E%PM	E%SAV
1.96	12.50	30.20	1.96	5.26	3.76
2.25	7.54	28.54	2.25	4.21	18.54
2.50	3.96	20.43	2.50	4.09	17.90
2.82	4.20	11.88	2.82	4.37	17.74
3.09	3.58	12.46	3.09	4.83	11.82
3.37	6.59	12.83	3.37	1.16	10.78

W3			W2		
$F_n B$	E%PM	E%SAV	$F_n B$	E%PM	E%SAV
1.96	5.41	2.95	1.96	31.07	51.09
2.25	0.81	15.80	2.25	5.072	43.96
2.50	8.97	3.09	2.50	6.16	47.98
2.82	14.01	15.53	2.82	3.72	52.79
3.09	20.18	33.02	3.09	4.69	58.84
3.37	11.29	53.67	3.37	6.99	42.44

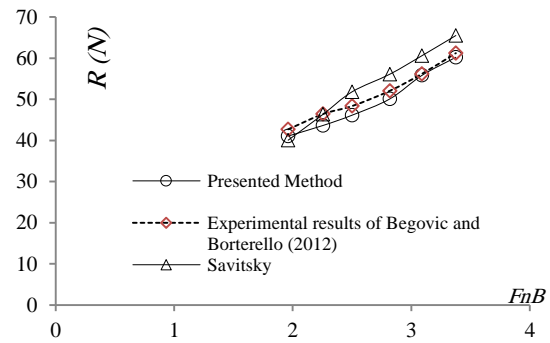
جدول (۳) خطای روش حاضر در پیش بینی مقاومت شناور پروازی ناپولی.

W1			MONO		
$F_n B$	E%PM	E%SAV	$F_n B$	E%PM	E%SAV
1.96	19.21	18.42812	1.96	3.86	6.15
2.25	7.63	13.12597	2.25	6.03	0.15
2.50	1.456	8.470057	2.50	4.61	7.17
2.8	0.27	9.567194	2.8	3.78	7.77
3.09	3.97	5.124287	3.09	0.65	7.85
3.37	0.48	1.2455	3.37	1.63	6.99

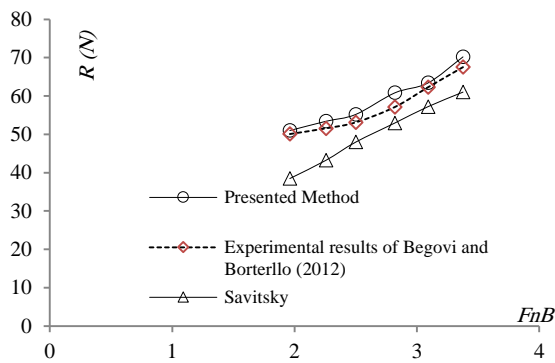
W3			W2		
$F_n B$	E%PM	E%SAV	$F_n B$	E%PM	E%SAV
1.96	1.91	23.14609	1.96	10.69	5.74
2.25	3.62	16.16534	2.25	1.24	3.19
2.50	3.95	9.661017	2.50	3.77	1.63
2.8	6.49	7.301698	2.8	0.84	3.34
3.09	1.79	8.156712	3.09	0.68	7.65
3.37	3.92	9.696521	3.37	2.21	12.11



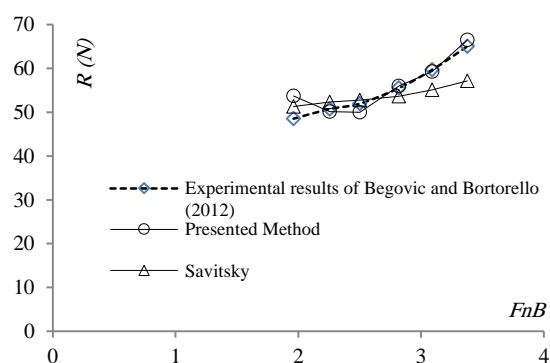
(ب)



(الف)

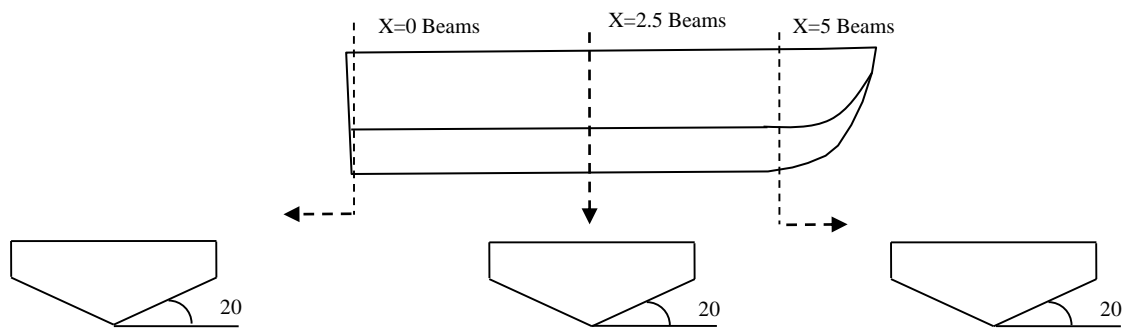


(د)

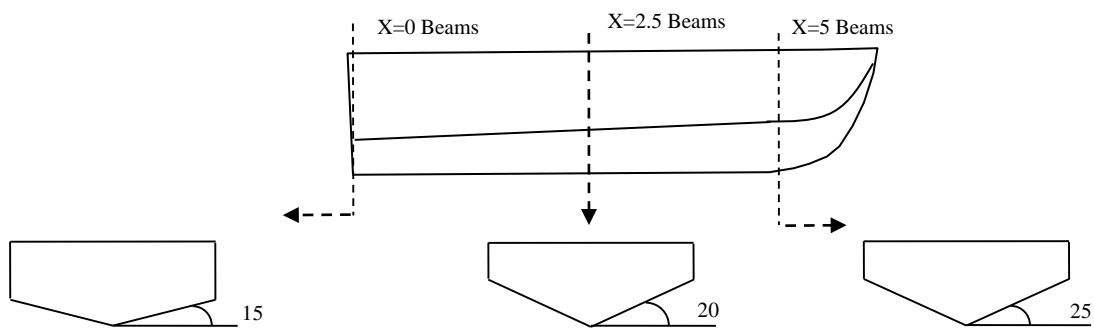


(ج)

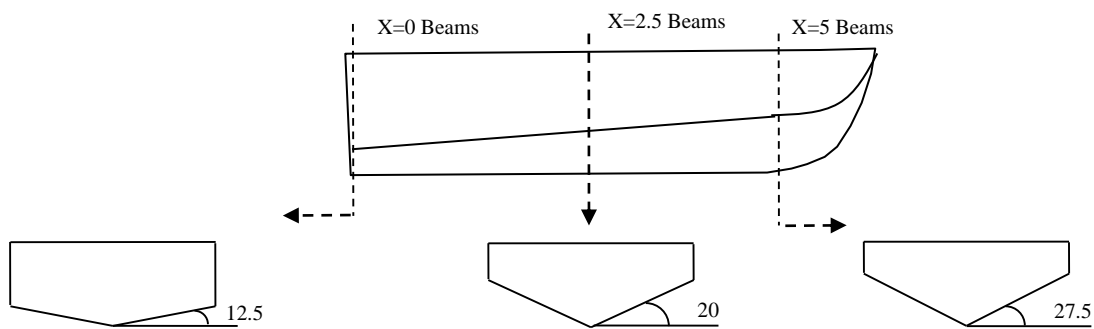
شکل (۹) مقایسه زاویه تریم پیش بینی شده برای شناورهای پروازی ناپولی با نتایج آزمایشگاهی [۱۶] (الف) بدنه MONO، (ب) بدنه W1، (ج) بدنه W2 و (د) بدنه W3.



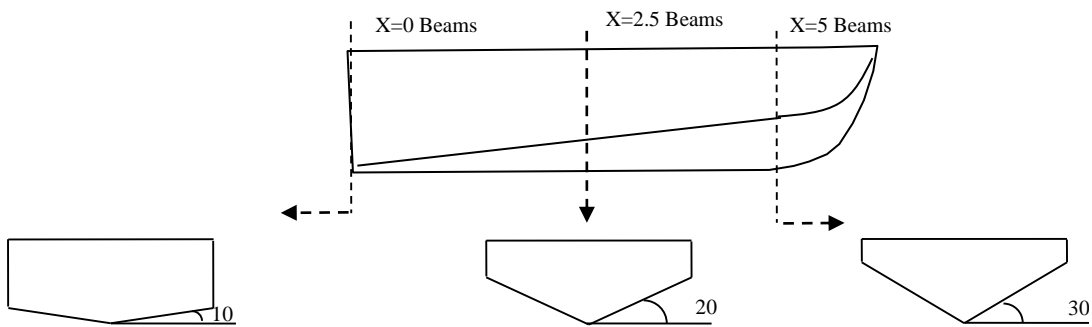
(الف) حالت منشوری.



(ب) زاویه رأس متغیر با شیب ۰.۲.



(ج) زاویه رأس متغیر با شیب ۰.۳.



(د) زاویه رأس متغیر با شیب ۰.۴.

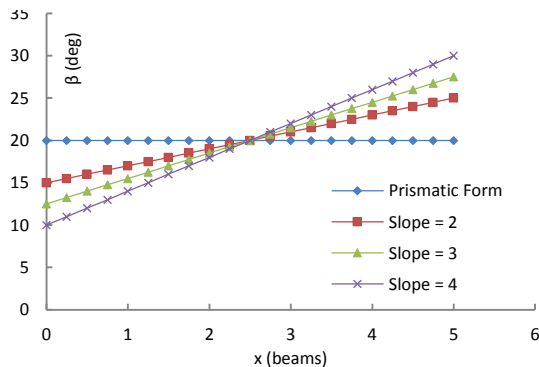
شکل (۱۰) هندسه شناورهای تعریف شده برای بررسی اثرات زاویه رأس.

۵- نتایج

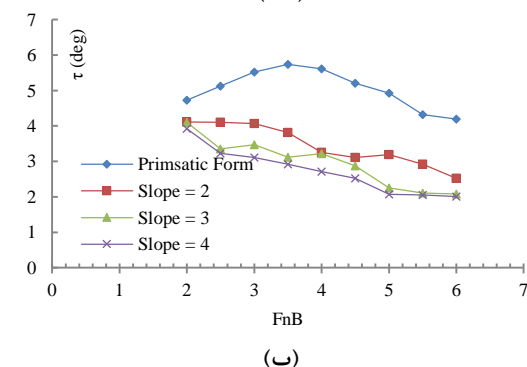
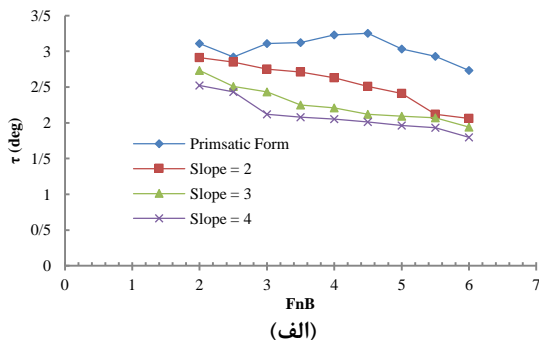
شکل (۱۳)، مقاومت پیش‌بینی شده برای شناور پروازی مورد بررسی را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که زاویه رأس متغیر با شیب ۲ منجر به کاهش زاویه تریم شناور می‌شود. از طرفی دیگر، زاویه رأس متغیر با شیب ۳ افزایش بسیار کمی در مقاومت ایجاد می‌نماید. زاویه رأس متغیر با شیب ۴ نیز منجر به افزایش چشمگیری در مقاومت می‌گردد.

۵-۲- جمع‌بندی نتایج

در نهایت، سعی شده است تا اثرات زاویه رأس متغیر بر زاویه تریم و مقاومت شناور، مورد بررسی قرار بگیرد.



شکل (۱۱) روند تغییرات زاویه رأس در راستای طول بی‌بعد برای شناور پروازی مورد بررسی.



شکل (۱۲) اثرات زاویه رأس متغیر بر تریم شناور مورد بررسی (الف) حالت سبک و (ب) حالت سنگین.

به منظور بررسی اثرات زاویه رأس بر عملکرد شناورهای پروازی، یک شناور پروازی منشوری شکل مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، از اساس شناورهای پروازی فریدزما [۱۷] با نسبت طول به عرض ۵ با زاویه رأس ۲۰ درجه استفاده شده است. شناور یکبار در وضعیت سبک و یک بار در وضعیت سنگین قرار داده شده است. فرض شده است که زاویه رأس شناور به صورت خطی با شیب‌های مختلف ۲ تا ۴ تغییر نماید (منظور از شیب، شیب تغییرات زاویه رأس در راستای طول بی‌بعد شده بر حسب عرض می‌باشد) بطوریکه میانگین زاویه رأس برابر با ۲۰ درجه شود. مشخصات شناور در جدول (۴) نشان داده شده است. همچنین، هندسه‌ای از شناورهای تولید شده در شکل (۱۰) به تصویر کشیده شده است. در این شکل، برای هر شناور، سه مقطع پاشنه، میانی، و سینه به تصویر درآمده‌اند تا تغییرات زاویه رأس از سینه تا پاشنه به صورت واضح‌تری قابل رؤیت باشد. نمودار تغییرات زاویه رأس در راستای طول شناور برای هر بدنه نیز در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. نمودار زاویه رأس بر حسب طول بی‌بعد (بی‌بعد شده بر حسب عرض) را نشان می‌دهد. نقطه $x=0$ نماد پاشنه شناور و نقطه $x=5$ نماد جلویی‌ترین نقطه شناور است.

جدول (۴) شرایط مورد استفاده برای مدل‌سازی شناورهای پروازی با زاویه رأس متغیر در راستای طول شناور.

نسب طول به عرض شناور	۵
طول شناور	۱/۱۴۳ متر
ورن بی‌بعد شناور	۰/۳۰۴ و ۰/۶۰۸
زاویه رأس میانگین	۲۰ درجه
موقعیت مرکز ثقل	۶۵٪ طول شناور از سینه
شیب‌های در نظر گرفته شده برای تغییرات زاویه رأس	۰، ۲، ۳ و ۴

۵-۱- زاویه تریم و مقاومت محاسبه شده

زاویه تریم پیش‌بینی شده برای شناور پروازی مورد مطالعه، در شکل (۱۲) نشان داده شده است. از این شکل، کاملاً مشخص است که زاویه تریم شناور، زمانی که زاویه رأس در راستای طول تغییر می‌نماید، نسبت به حالت منشوری شکل کاهش می‌یابد. هر چه میزان شیب تغییرات زاویه رأس بیشتر باشد، این کاهش بیشتر است. در وزن بیشتر، میزان این تغییرات بسیار محسوس می‌باشد.

برای همین منظور، با استفاده از رابطه

$$\%V = \frac{a^{\text{Prismatic}} - a^{\text{Variable}}}{a^{\text{Prismatic}}} \quad (43)$$

میزان تغییرات یک پارامتر نسبت به حالت منشوری شکل محاسبه شده است. سپس، با استفاده از میانگین گیری، میانگین تغییرات محاسبه شده است.

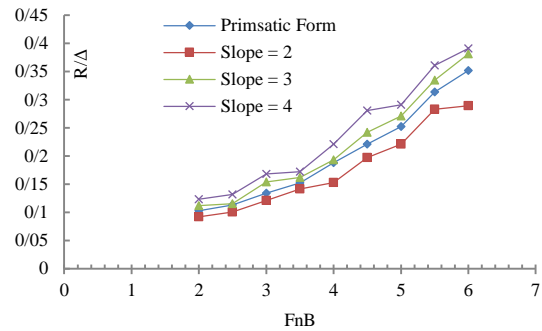
میانگین تغییرات زاویه رأس و مقاومت برای هر کدام از شناورها، در قالب یک نمودار ستونی ترسیم شده است. این تغییرات، در شکل (۱۴) نشان داده شده است. نمودار ستونی ترسیم شده نشان می‌دهند که برای شناور سنگین همواره میزان کاهش زاویه تریم بیشتر می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که برای یک شناور پروازی، ایجاد یک زاویه رأس متغیر با شیب ملایم می‌تواند منجر به کاهش زاویه تریم و مقاومت شناور شود در صورتیکه شیب زیادتر شود، مقاومت شناور افزایش خواهد یافت.

۶- نتیجه گیری

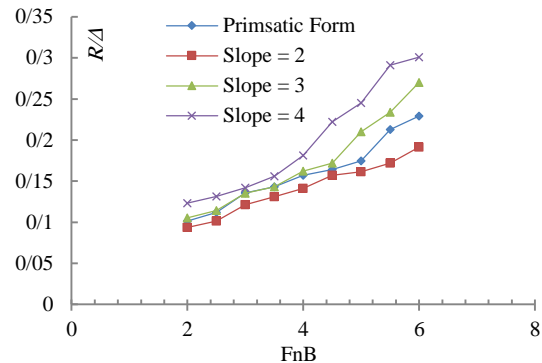
در مقاله حاضر، سعی گردید تا مطالعه‌ای بر اثرات زاویه رأس متغیر بر رفتار شناور پروازی در آب آرام انجام شود. برای این منظور، یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی مقاومت و زاویه تریم شناور پروازی با زاویه رأس متغیر ارائه گردید. مقایسه نتایج روش حاضر با نتایج آزمایشگاهی پیشین نشان می‌دهد که این روش دارای دقت مناسبی در پیش‌بینی زاویه تریم و مقاومت شناور دارا می‌باشد.

در ادامه، تلاش شد تا اثرات تغییرات زاویه رأس بر تریم و مقاومت شناور ارائه گردد. در این راستا، یک شناور با زاویه رأس میانگین ۲۰ درجه در نظر گرفته شد. برای این شناور، دو وزن سبک و سنگین فرض شد. سپس مقرر گردید که زاویه رأس این شناور با شیب‌های ۲، ۳ و ۴ در راستای طول بی‌بعد تغییر نماید. نتایج حاصل نشانگر اینست که برای این شناور، شیب ۲ اثرات مطلوبی داشته و در عین حال مقاومت و زاویه تریم را کاهش می‌دهد. اما شیب‌های ۳ و ۴ منجر به کاهش زاویه تریم و افزایش مقاومت می‌شود.

طراحی یک شناور پروازی تنها به رفتار در آب آرام محدود نمی‌شود و نیازمند بررسی رفتار شناور در آب مواج و همچنین بررسی حرکات رول و پایداری شناور در صفحه افق می‌باشد. در تحقیقات بعدی، سعی بر این است که با توسعه مدل‌های جدید، اثرات تغییر زاویه رأس بر دینامیک

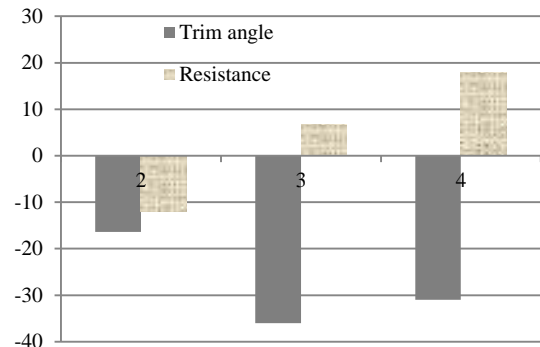


(الف)

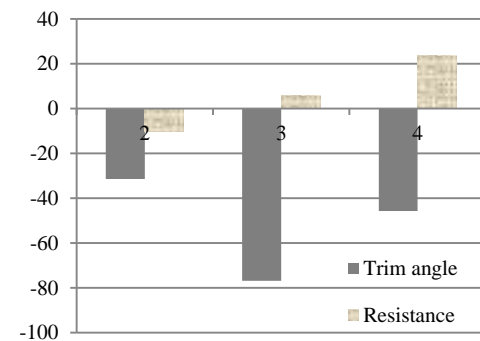


(ب)

شکل (۱۳) اثرات زاویه رأس متغیر بر مقاومت شناور مورد بررسی (الف) حالت سبک و (ب) حالت سنگین.



(الف)



(ب)

شکل (۱۴) میانگین تغییرات حاصل از تغییر شکل بدنه برای شناور مورد بررسی (الف) حالت سبک و (ب) حالت سنگین.

- شناور، رفتار آن در صفحه عرضی و پایداری آن در صفحه افق مورد بررسی قرار گیرد تا نهایتاً مجموعه‌ای از داده‌های کامل برای مهندسان حوزه دریایی فراهم شود که بتوانند به طراحی نهایی شناورهای پروازی در داخل کشور دست یابند.
- ۷- مراجع**
- [1] Savitsky, D., "Hydrodynamic Design of Planing Hulls", Marine Technology, Vol. 1, pp. 71-95, 1964.
- [2] Savitsky, D., Brown W., "Procedure for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water", Marine Technology, Vol. 13, pp. 381-400, 1978.
- [3] Bortorello C., Oliviero, L., "Hydrodynamic Resistance Assesment of Non-Monohedral Planing Hull Fomrs Based on Savitsky's method", In: High-Perfomrance Marine Vehicles, Lounceston, Austrilia, pp. 432-446, 2006.
- [4] Pierson D., and Leshnover P., "An Analysis of the Fluid Flow in the Spray Root and Wake Regions of Flat Planing Surfaces", Davidson Labratory, Report No. SIT-DL-48-335, 1948.
- [5] Savitsky, D., "The Effect of Warp on the Performabce of Planing Hulls", In: 3rd Cheaspeake Power Boat Symposium, Annapolis, MD, USA, 2012.
- [6] Zarnick, E. E., "A Non-linear Mathematical Model of Motion of a Planing Boat in Regular Waves", David Taylor Naval Ship Research and Development Center, Repoert No. AD-A052039, 1978.
- [7] Akers RA., "Dynamic Analysis of Planing Hulls in the Vertical Plane", In: Meeting of the New England Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1999.
- [8] Zhao R., Faltinsen O. M., Haslum HA., "A Simplified Non-Linear Analysis of a High-Speed Planing Craft in Calm Water", In: 4th International Conference on Fast Sea Transportaion (FAST 97), Sydney, Austrilia, 1997.
- [9] Vorus W.S., "A Flat Cylinder Theory for Vessel Impact and Steady Planing Resistance", Journal of Ship Research, Vol. 40, pp. 89-106.
- [10] Savander B. S., Scorplo S. M., Taylor. R. K., "Steady Hydrodynamic Analysis of Planing Surfaces", Journal of Ship Research, Vol. 46, pp. 248-279.
- [11] Savander BR., Maki K. J., Land J., "The Effects of Deadrise and Deadrise Variation on Planing Hull Performance", In; 2nd Cheaspeake Power Boat Symposium, 2010.
- [12] Algarin R, Tascon O., "Hydrodynamic Modeling of Planing Boats with Asymmetric and Steady Condition", In: IX HSMV, Naples, 2011.
- [13] Algarin R., Tascon O., "Analysis of Dynamic Stability of Planing Craft on the Vertical Plane", Ship Sciece and Technology, Vol. 8, pp. 35-43, 2014.
- [14] Garne K., "Improved Time Domain Simulation of Planing Hulls in Waves by Correction of the Near-Transom Lift", International Shipbulding Progress, Vol. 52, pp. 201-230, 2005.
- [15] Savitsky D., DeLorme MF., Datla R., "Inclusion of Whisker Spray Drag in Performance Prediction Method for High-Speed Planing Hulls", Marine Technology, Vol. 44, pp. 35-56, 2007.
- [16] Begovic E., Bertorello C., "Resistance Assesment of Warped Hullform", Ocean Engineering, Vol. 56, pp. 28-42. 2012.
- [17] Fridsma G., "A Systematic Study of Rough Water Performance of Planing Boats", Davidson Labratory, Report No 1275, 1969.

فهرست علائم

مقاطع دو بعدی		نیروهای وارد بر شناور		پارامتر مربوط به شناور	
نیم عرض خیس شده (متر) و نرخ تغییرات آن در زمان	\dot{C} و C	نیروی بویانسی (نیوتن)	B	عرض شناور (متر)	B
نیروی درگ اصطکاکی مقطع (نیوتن بر متر)	D_{ξ}	ضریب درگ اصطکاکی	C_F	وزن بی بعد شناور $C_{\Delta} = \Delta / \rho g B^3$	C_{Δ}
نیروی هیدرودینامیکی عمودی مقطع (نیوتن بر متر)	f_{HD}^V	درگ اصطکاکی (نیوتن)	D	عدد فرود عرضی شناور $Fn_B = U / \sqrt{gB}$	Fn_B
نیروی هیدرواستاتیکی مقطع (نیوتن بر متر)	f_{HS}	درگ ناشی از پاشش (نیوتن)	D_{Spra}^y	طول شناور (متر)	L
مقدار کاهش ترانسوم در مقطع	F_{red}	نیروی عمودی هیدرودینامیکی (نیوتن)	N	طول خیس شده چاین	L_c
سطح خیس شده مقطع (متر)	S_{ξ}	نیروی مقاومت وارد بر شناور (نیوتن)	R	طول خیس شده کیل (متر)	L_K
سرعت برخورد گوه به آب (متر بر ثانیه)	w	نیروی در راستای محور x	اندیس x	طول خیس شده میانگین شناور	L_M
فاصله عرضی (متر) و عمودی (متر) از رأس گوه	z و y	نیروی در راستای محور z	اندیس z	موقعیت طولی مرکز ثقل (درصد طول از سینه شناور)	LCG
ارتفاع چاین	z_{CW}	گشتاور پیچ	اندیس θ	سرعت پیشروی شناور (متر بر ثانیه)	U
				زاویه رأس (ددرایز) شناور (درجه)	β
				وزن شناور (نیوتن)	Δ
				زاویه تریم شناور (درجه)	τ
				زاویه تراست نسبت به راستای کیل شناور (درجه)	θ_T
				موقعیت عمودی قرار گیری تراست نسبت به دستگاه مختصات متصل به بدنه (متر)	ζ_T
پارامترهای فیزیکی		فواصل و دستگاه مختصات			
شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه)	G	فاصله طولی آغاز اثرات ترانسوم نسبت به ترانسوم (متر)	a	فاصله طولی آغاز اثرات ترانسوم	a'
چگالی سیال (کیلو گرم بر متر مکعب)	ρ	فاصله طولی (متر، مثبت رو به جلو)، عرضی (متر، مثبت رو به سمت راست) و عمودی (متر، مثبت رو به بالا) از دستگاه ثابت	x, y, z	فاصله طولی (متر، مثبت رو به سینه شناور)، عرضی (متر، مثبت رو سمت راست شناور) و عمودی (متر، مثبت رو به بالا) از دستگاه مختصات متصل به بدنه	ξ, η, ζ
پتانسیل سیال	ϕ	موقعیت طولی خیس شدگی چاین (متر)	ξ_C	موقعیت طولی تقاطع کیل با آرام (متر)	ξ_K
لزجت سینماتیکی سیال	ν	موقعیت طولی محل تقاطع لبه پاشش جاروبی با چاین (متر)	ξ_W	موقعیت طولی ترانسوم (متر)	ξ^T
		موقعیت عمودی مرکز درگ اصطکاکی	ζ_D	موقعیت عمودی مرکز درگ جاروبی	ζ_{Spra}